

CMNE/CILAMCE 2007
Porto, 13 a 15 de Junho, 2007
©APMTAC, Portugal 2007

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO NÃO-LINEAR EM FLEXÃO E EM CORTE PARA ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO SUJEITOS A SOLICITAÇÕES CÍCLICAS

Hugo Rodrigues^{1*}, Humberto Varum¹ e Aníbal Costa¹

1: Departamento de Engenharia Civil
Universidade de Aveiro
Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro
e-mail: hrodrigues@aveiro-norte.ua.pt; hvarum@civil.ua.pt; acosta@civil.ua.pt

Palavras chave: Análise não-linear, Corte, Flexão, Betão Armado, Acções cíclicas

Resumo. *A existência de elementos de betão armado com uma resposta predominante em corte é comum num número significativo de edifícios existentes. Danos severos e/ou colapso de edifícios relacionados com deficiências do comportamento em corte dos elementos de betão armado tem sido observados em sismos recentes. O principal objectivo deste trabalho é a apresentação de uma ferramenta numérica desenvolvida para a simulação do comportamento de elementos de betão armado sujeitos a acções cíclicas, como os esforços induzidos pela acção dos sismos. O modelo proposto permite uma melhor previsão da resposta não-linear de edifícios de betão armado sujeitos a acções sísmicas severas, combinando o comportamento não-linear em flexão e em corte. Neste artigo é proposto um macro-modelo que contempla a não-linearidade em corte e em flexão de elementos de betão armado. O macro-modelo proposto foi implementado num programa de análise estrutural, VisualANL, e calibrado com resultados de ensaios à escala real de pilares de betão armado.*

1 INTRODUÇÃO

O comportamento dos elementos estruturais face a solicitações horizontais, como as induzidas pela acção sísmica é controlado por fenómenos de flexão e/ou corte. Neste Artigo descreve-se o modelo desenvolvido para representar o comportamento não-linear histerético de elementos de betão armado em corte, implementado no programa VisualANL [1].

2 INFLUÊNCIA DO CORTE NA RESPOSTA DE ESTRUTURAS SUJEITAS A ACÇÕES HORIZONTAIS

O comportamento em corte é importante na resposta das estruturas face a acções horizontais, surgindo muitas vezes danos ou colapsos em estruturas, porque estas não estão preparadas para lhes resistir.

Um dos exemplos de elementos em que o comportamento em corte é preponderante face à flexão são as paredes resistentes, ou shear walls. Estes elementos estruturais, são utilizados para suportar não só as acções verticais, mas principalmente as acções horizontais dada a sua elevada rigidez lateral. A classificação das paredes resistentes depende da relação entre o seu comprimento e altura. Existem várias propostas para esta classificação, por exemplo, o Eurocódigo 2 [2] define que se considera um elemento estrutural como parede resistente quando a razão entre a altura da secção transversal e o seu comprimento seja superior a 4. Devido à sua elevada rigidez lateral estes elementos podem ter um bom comportamento sísmico e melhorar de forma significativa a resposta estrutural dos edifícios, diminuindo os deslocamentos globais da estrutura e, conseqüentemente, protegendo também os elementos não estruturais e elementos estruturais menos resistentes [3].

Existem, no entanto, outros elementos em que não é esperado que o seu comportamento seja essencialmente dominado pelo corte, nos quais surgem fenómenos não previsto em projecto, induzindo danos ou o colapso prematuro das estruturas. Vários exemplos da importância do comportamento em corte já foram referidos no Capítulo 2 desta dissertação, podendo estar associados a pilares curtos, ou nas ligações dos elementos estruturais (nós).

3 MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO NÃO-LINEAR EM CORTE DE ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO

Durante os últimos anos vários procedimentos analíticos para modelar o comportamento não-linear em corte de elementos de betão armado têm sido propostos. Estes podem ser divididos em dois grandes grupos: micro-modelos e macro-modelos [4]. Os micro-modelos são muito refinados, como por exemplo, modelos baseados no método dos elementos finitos com grande discretização, que permitem obter soluções muito aproximadas. Este tipo de modelos tem grande interesse no estudo de fenómenos locais, calibração de macro-modelos, ou estudo de elementos especiais. No entanto, a sua utilização é trabalhosa para análises globais ou complexas, como as análises dinâmicas não-lineares de estruturas de edifícios. A utilização de um micro-modelo complexo, como por exemplo para a modelação de um edifício de vários andares requer um grande nível de discretização,

consequentemente um elevado número de elementos, e para além das dificuldades associadas à caracterização do comportamento dinâmico, exigem um elevado consumo de tempo para a introdução de dados, tempo de cálculo e interpretação dos resultados, o que inviabiliza a utilização deste tipo de modelos para análises mais complexas. Por outro lado, os macro-modelos, requerem um menor número de elementos para a sua formulação, o que reduz significativamente o tempo de definição do modelo e o tempo de cálculo, tornando-os mais viáveis de aplicar. No entanto, este tipo de modelos tem limitações associadas à dificuldade de caracterização de uma curva de comportamento global do macro-modelo. Este tipo de modelos pode ser utilizado com resultados satisfatórios para elementos estruturais que demonstrem ter comportamento predominante em corte. Três tipos de macro-modelos são utilizados para a simulação do comportamento não-linear em corte de elementos de betão armado: o modelo da viga equivalente; o modelo da biela equivalente; e um modelo que recorre a um elemento vertical, apresentados por Vulcano e Bertero [5] e Linde [6]. O primeiro macro-modelo desenvolvido com recurso a elementos verticais foi originalmente sugerido Kabeyasawa *et al.* [7] para simulação de elementos de betão armado com comportamento predominante em corte, utilizando molas axiais em cada extremidade da parede, uma mola de rotação no centro para representar a componente devida à flexão e uma mola horizontal para representar a componente devida ao corte. Vulcano *et al.* [8] adicionaram mais molas axiais indicando que são necessárias pelo menos quatro molas para melhor representar o comportamento em flexão, retirando a mola de rotação no centro.

Linde [6] sugeriu um modelo com três molas axiais e uma mola horizontal (Figura 1), desenvolvendo assim uma formulação cinemática mais simples para o modelo.

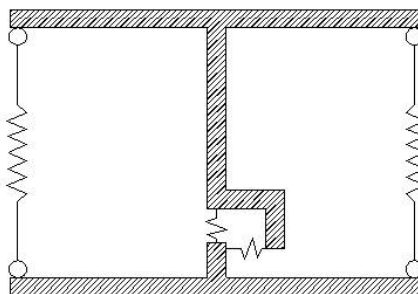


Figura 1: Macro-modelo proposto por Linde [6]

Mais recentemente, vários autores desenvolveram modelos semelhantes ao proposto por Vulcano *et al.* [8], com recurso a múltiplas molas verticais propondo diferentes leis constitutivas para o betão e para o aço [9]. Estes macro-modelos, de uma forma geral, representam bem o comportamento em flexão. Com as molas axiais nos limites dos elementos, caracterizando-se com rigor o comportamento dos elementos de betão armado se a resposta for controlada predominantemente por flexão. No entanto, estes são menos exactos para simular a resposta quando o corte é predominante.

Diversos modelos não-lineares de corte foram desenvolvidos, mas poucos mostraram resultados satisfatórios. Por esta razão, os macro-modelos de elementos com comportamento não-linear em corte tem sido aplicados frequentemente apenas para reproduzir simplesmente a resposta observada em ensaios experimentais tentando ajustar o modelo através da alteração da posição vertical da mola horizontal, para ter em conta indirectamente o comportamento em corte destes elementos [4].

Filippou *et al.* [10] propuseram um macro-modelo mais simples para representação do corte (Figura 2). Este macro-modelo representa a distorção provocada pelas forças de corte nas zonas inelásticas do elemento. Trata-se de um modelo simplificado que pretende apenas uma representação genérica. O macro-modelo desenvolvido consiste em concentrar o comportamento não-linear em corte em molas de translação na extremidade de um elemento central com comportamento infinitamente rígido.



Figura 2: Macro-modelo proposto por Filippou *et al.* [10]

4 MACRO-MODELO PROPOSTO

4.1 Introdução

Depois de uma breve revisão sobre alguns dos modelos desenvolvidos para representação do comportamento de elementos de betão armado, em que o corte tem uma influência preponderante, apresenta-se de seguida o macro-modelo proposto e implementado no programa de análise não-linear VisualANL. Para a idealização do elemento estrutural foi utilizado o macro-elemento de barra já implementado no programa de análise não-linear em flexão VisualANL, que consiste na representação do comportamento de um elemento de barra através de três sub-elementos associado em série. Os sub-elementos das extremidades concentram o comportamento não-linear, designados por rótulas plásticas, e para o elemento central é assumido um comportamento elástico linear.

Dado que no programa já existia um macro-modelo de barra implementado para representar o comportamento não-linear em flexão, desenvolvido por Varum [11], optou-se por utilizar o mesmo macro-modelo, acrescentando-lhe o comportamento não-linear em corte. O macro-modelo original que existia no programa VisualANL tinha a capacidade de representar o comportamento linear e/ou não-linear em flexão dos elementos de betão armado. Com a implementação deste modelo de comportamento em corte, o programa passa a ter a capacidade de simular os dois fenómenos em simultâneo. O macro-modelo referido admite que as deformações inelásticas estão concentradas nas extremidades dos elementos com um determinada comprimento. O comportamento não-linear em corte

nas extremidades do elemento será representado por um modelo não-linear histerético proposto e descrito neste artigo.

4.2 Descrição do macro-elemento

O modelo implementado pretende representar o comportamento não-linear de elementos estruturais de betão armado sujeitos ao corte e à flexão repetida e alternada. O programa de cálculo original, tinha a capacidade de representar o comportamento não-linear em flexão dos elementos de betão armado [11]. O modelo não-linear em corte foi implementado no macro-elemento estrutural de barra já programado (Ver Figura 3).

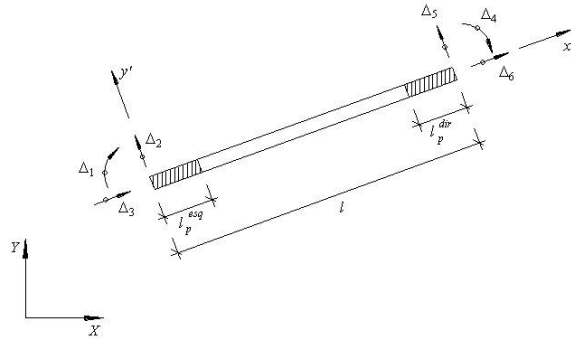


Figura 3: Macro-elemento de barra com seis graus de liberdade [11]

Este macro-elemento é composto por três sub-elementos, um sub-elemento central com comportamento linear e dois sub-elementos nas extremidades que representam as zonas com comportamento não-linear com um determinado comprimento fixo, designado por comprimento da rótula plástica. As deformações inelásticas deste sub-elementos com comprimento fixo são determinadas através da deformação da secção média. O comportamento não-linear em corte é caracterizado por uma curva base tri-linear envolvente (ver Figura 4) definida por cinco parâmetros em cada sentido, representando: fendilhação, resistência de pico e a rigidez pós-cedência.

- K_0 - rigidez inicial (troço 1)
- K_1 - rigidez pós-fissuração (troço 2)
- K_2 - rigidez pós-cedência (troço 3)
- d_1 - deslocamento correspondente à fissuração
- d_2 - deslocamento correspondente à cedência

Estes cinco parâmetros são definidos para ambos os sentidos do carregamento, ou seja, para o sentido positivo e negativo de deformações de corte, devendo a rigidez inicial

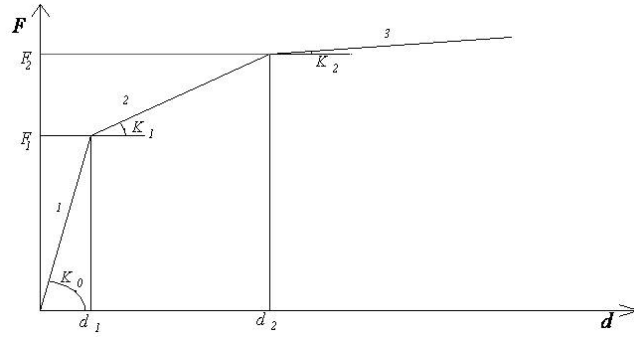


Figura 4: - Parâmetros de identificação da curva base de comportamento para um sentido genérico

K_0 ser igual em ambos os sentidos, uma vez que é calculada directamente a partir das características elásticas dos materiais e da geometria da secção.

Assim, são necessários nove parâmetros para definir a curva-base de comportamento de um elemento (ver Figura 5). Foi considerada a possibilidade de definição de parâmetros diferentes para cada um dos sentidos de comportamento, o que possibilita a aplicação desta lei de comportamento a qualquer secção de betão armado, permitindo simular secção não simétricas ou com armadura com qualquer distribuição.

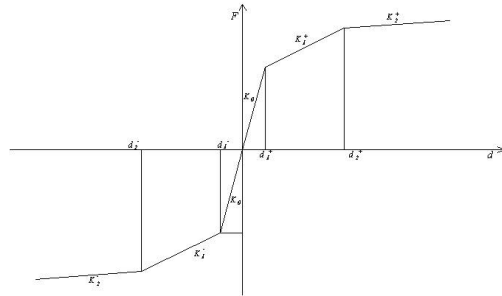


Figura 5: Curva base para os dois sentidos

O comportamento hysterético em corte é definido, para além da curva de comportamento não-linear, por três parâmetros globais que caracterizam: a degradação de rigidez (α), o efeito de aperto ou 'pinching' (β), e a degradação de resistência (γ).

4.3 Comprimento da rótula plástica

De acordo com a formulação do macro-elemento de barra de betão armado utilizado, a não-linearidade em corte é admitida concentrada junto das suas extremidades. De facto, nos elementos em que o corte é dominante a não-linearidade não se concentra apenas junto às extremidades dos elementos de betão armado, como nos elementos em que o comportamento em flexão é dominante, mas ao longo de todo o seu comprimento [12]. No entanto, foi estabelecido o compromisso de manter um macro-modelo com as mesmas car-

acterísticas geométricas para os dois modelos hysteréticos implementados (flexão e corte), concentrando a não-linearidade junto das extremidades, trabalhando os dois modelos com o mesmo comprimento de rótula plástica.

4.4 Comportamento em corte e flexão

O modelo de corte actua em simultâneo com o modelo de flexão, mas sem interacção entre si. A utilização de modelos independentes tem sido adoptada por diversos autores [12], modelando, tal como neste caso, o corte apenas como uma aproximação ao fenómeno. Esta separação permite uma grande liberdade na combinação dos modelos de corte com os de flexão, o que é uma vantagem em relação aos modelos globais que os consideram interligados, com as limitações associadas

5 COMPORTAMENTO HISTERÉTICO

5.1 Introdução

Após descrição do macro-elemento implementado para representar o comportamento em corte de elementos de betão armado, descrevem-se as regras de histerese que caracterizam o comportamento não-linear em corte destes elementos quando sujeitos a acções cíclicas. O modelo hysterético desenvolvido é baseado no modelo de Costa e Costa [12]. A escolha deste modelo assentpou na a versatilidade e no grau de refinamento.

5.2 Regras de histerese

O comportamento cíclico não-linear em corte dos elementos de betão armado é normalmente caracterizado por regras universais que reflectem a história de carga e dependem da lei de comportamento material. As regras de histerese implementadas são apresentadas de seguida e encontram-se exemplificadas na Figura 6.

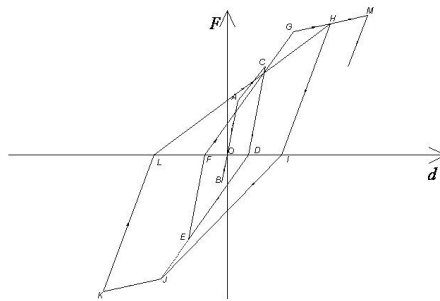


Figura 6: Regras de histerese do modelo implementado

Descarga: ocorre quando se dá a inversão do carregamento. A descarga é feita considerando ou não a degradação da rigidez, em função do ponto em que esta ocorre. Assim, para o modelo implementado são assumidos diferentes valores para a rigidez de descarga,

dependendo do troço em que esta ocorre. Considera-se que a descarga termina quando o valor da força máxima generalizada se anula.

Recarga: quando ocorre uma inversão do sinal da força generalizada dá-se a recarga (ver Figura 7), com uma mudança de rigidez, que é definida com base nos valores máximos de força e de deslocamento generalizado (F_{max} e d_{max}) atingidos nos ciclos anteriores.

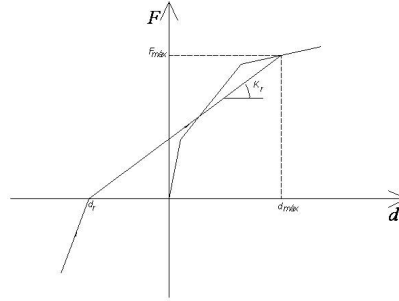


Figura 7: Recarga

Ciclos internos: tal como no modelo de flexão, este modelo hysterético também tem a capacidade de representar os ciclos internos, ou seja, quando se dá a inversão do carregamento antes de serem atingidos os valores máximos do deslocamento ou da força em ciclos anteriores.

Efeito de 'pinching': importante na representação do comportamento em corte de elementos de betão armado, como observado por diversos autores [13] [14] [15] [16] [4]. Este fenómeno simula o efeito de aperto e está relacionado com a abertura e refechamento das fendas durante a recarga (ver Figura reffig7). Este efeito é tido em conta no modelo através do parâmetro β , que afecta a rigidez de recarga. O ramo da recarga é dividido em dois troços, com rigidez distinta. O segundo troço da recarga aponta para o ponto de máximo deslocamento e força atingido nos ciclos anteriores.

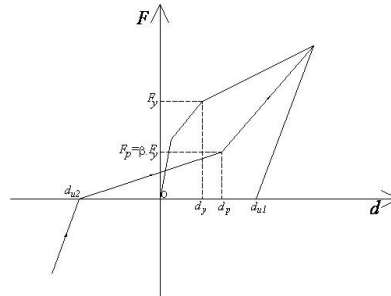


Figura 8: Efeito de 'pinching'

Degradação de rigidez: a degradação de rigidez é controlada pelo parâmetro α . Este parâmetro afectará a rigidez de duas formas distintas, a primeira directamente al-

terando a rigidez de descarga, e a segunda está relacionada com a degradação de resistência, já que a rigidez da recarga une directamente o ponto onde a força é nula na descarga e a força máxima atingida no ciclo anterior.

Degradação de resistência: a consideração da degradação de resistência fundamenta-se no proposto por *Wang et al.* [17] e é semelhante ao que foi implementado no modelo não-linear em flexão, baseada no conceito de degradação acumulada, em que a degradação de um elemento estrutural sujeito a forças cíclicas é dependente do máximo deslocamento sofrido por esse elemento durante cada ciclo.

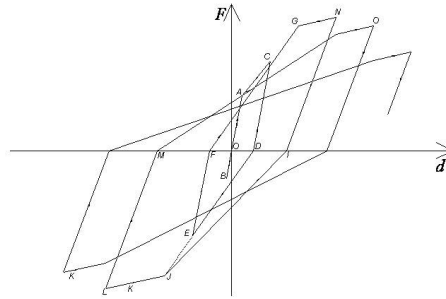


Figura 9: Regras de histerese do modelo implementado com degradação de resistência

No modelo implementado, a degradação corresponde a um novo valor da força máxima de chegada, como exemplificado na Figura 9. A força máxima de chegada, que no caso de não haver degradação corresponderia à força máxima atingida no ciclo anterior, é corrigida por uma nova força. Salienta-se que a diminuição da força de chegada para o mesmo deslocamento irá induzir também degradação da rigidez de recarga.

6 CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

6.1 Introdução

Com o objectivo de demonstrar a eficiência do modelo de corte implementado, foram utilizados os resultados da monitorização detalhada de um pilar forte de um pórtico estudado no âmbito do projecto ICONS [18]. Foi modelado o comportamento desse pilar considerando numa primeira fase apenas a não-linearidade em flexão, e posteriormente, combinando a não-linearidade em flexão e corte.

6.2 Descrição do ensaio experimental

Nos ensaios realizados no âmbito do projecto ICONS, foram instalados 27 transdutores de deslocamentos (22 no primeiro piso e 5 no segundo piso) para medição das deformações no pilar forte, onde eram esperados níveis de deformação elevados. A distribuição adoptada para transdutores, ilustrada na Figura 10, permitiu registar a deformação detalhada, que permitirá separar as componentes de deformação devido à flexão e ao corte, assim como a deformação axial.

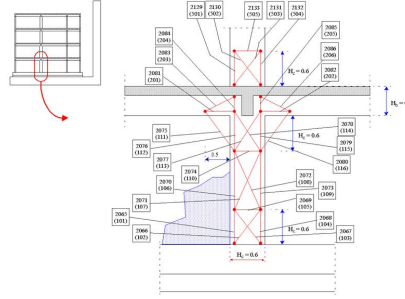


Figura 10: Instrumentação adoptada no pilar forte ao nível do primeiro piso [18]



Figura 11: Instrumentação adoptada no pilar forte ao nível do primeiro piso [18]

6.3 Descrição do modelo

Para representar o comportamento do pilar em estudo foi realizada uma análise não-linear estática com deslocamentos e rotações impostas. Dos ensaios PsD sobre o pórtico foram retiradas as evoluções das condições fronteira no topo do pilar, em termos de deslocamento horizontal e rotação. Nos ensaios do pórtico foi medida a evolução das forças globais de piso. A parcela da força de corte que é transmitida ao pilar em estudo foi estimada com base em procedimentos simplificados. Para o estudo do pilar foi considerado um elemento encastrado na base, com as características geométricas, propriedades dos materiais e esforço axial do pórtico ensaiado (ver Figura 12). Como referido anteriormente, foram aplicadas no topo do pilar as evoluções de deslocamento horizontal e de rotação ao longo do ensaio, apresentadas nas Figuras 13 e 14, respectivamente.

Em relação à força de corte no pilar, foi realizada uma primeira estimativa distribuindo as forças de piso proporcionalmente à rigidez elástica de flexão de todos os pilares do piso. Posteriormente, e de forma a considerar a eventual redistribuição de esforços de corte pelos pilares do piso, ao longo do processo não-linear dinâmico, com eventual dano de alguns pilares, foram analisados os resultados numéricos da análise não-linear dinâmica a todo o portico [1]. Assim, pelo primeiro processo, admitindo que uma distribuição das forças proporcional à rigidez elástica de flexão verifica-se que o pilar em causa possui uma rigidez elástica de cerca de 83% do somatório da rigidez dos pilares do 1º piso.

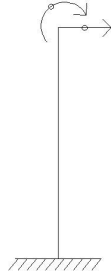


Figura 12: Modelo adoptado para simulação do pilar em estudo

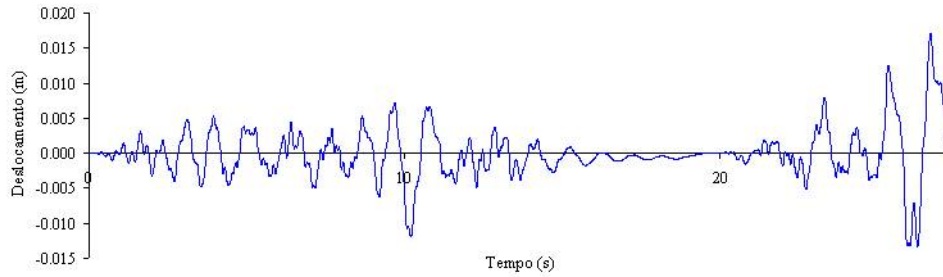


Figura 13: Deslocamento horizontal aplicado no topo do pilar

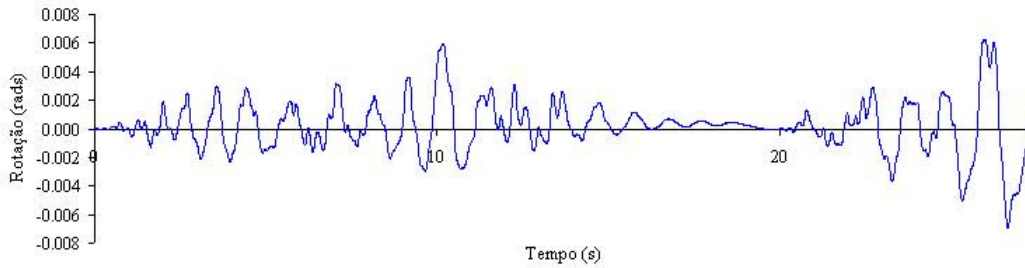


Figura 14: Rotações aplicadas no topo do pilar

No entanto, pelo facto do pilar estar inserido numa estrutura hiperestática, e em regime de comportamento não-linear dinâmico, a distribuição real das forças de corte no piso não dependerá apenas da rigidez elástica dos pilares. Os resultados da calibração do modelo do pórtico, considerando não-linearidade em flexão, foram utilizados para estimar o esforço de corte absorvido pelo pilar em estudo. Na Figura 15 representa-se em simultâneo a evolução do corte basal ao nível do primeiro piso e do esforço de corte no pilar em estudo com o modelo numérico. Da análise dos resultados, e particularmente para os picos de força, verifica-se que o pilar absorve em média cerca de 72% do esforço de corte total de piso. Assim, na modelação do comportamento do pilar, que se descreverá de seguida,

considerou-se este valor.

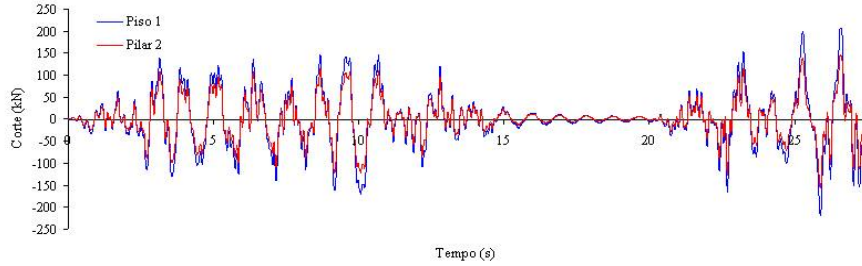


Figura 15: Evolução do corte do piso 1 e do pilar em estudo (resultados numéricos)

6.4 Análise dos resultados

Com o modelo apresentado foram simulados os ensaios realizados sobre o pilar, com recurso a uma análise não-linear estática com deslocamentos e rotações impostas. Numa primeira análise é considerada para as rótulas plásticas na extremidade do pilar apenas o comportamento não-linear em flexão. Posteriormente, é considerada em simultâneo a não-linearidade em corte e em flexão.

Em relação ao modelo considerando apenas a não-linearidade em flexão, apresentam-se na Figura 16 as evoluções no tempo do esforço de corte no pilar, obtida com o modelo numérico e estimada a partir dos resultados experimentais. Na Figura 17 são apresentadas as curvas força de corte vs deslocamento de topo.

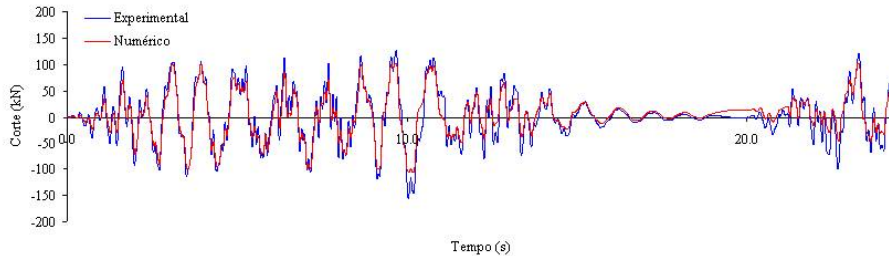


Figura 16: Evolução do corte ao longo do ensaio considerando apenas a não-linearidade em flexão

Considerando simultaneamente a não-linearidade em corte e em flexão, apresenta-se na Figura 18 os resultados em termos de evolução no tempo do esforço de corte no pilar, obtidos com o modelo numérico e estimados a partir dos resultados experimentais, na Figura 19 são apresentadas as curvas força de corte vs deslocamento no topo do pilar.

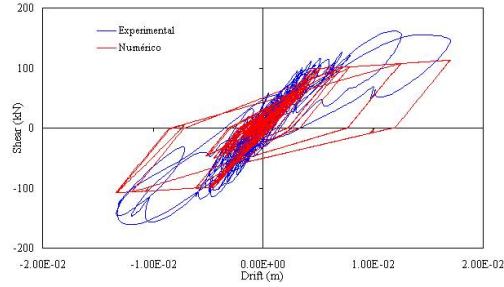


Figura 17: Relação esforço de corte *vs* deformação considerando apenas a não-linearidade em flexão

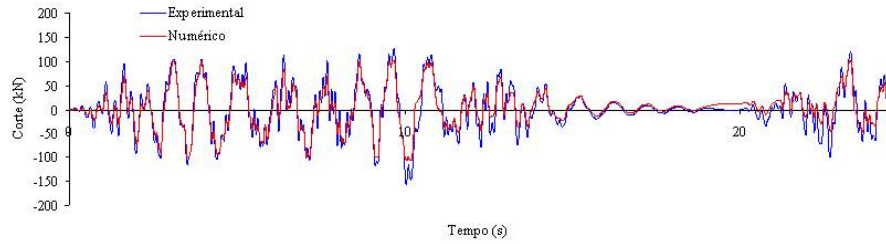


Figura 18: Evolução do esforço de corte ao longo do tempo considerando não-linearidade em flexão e corte

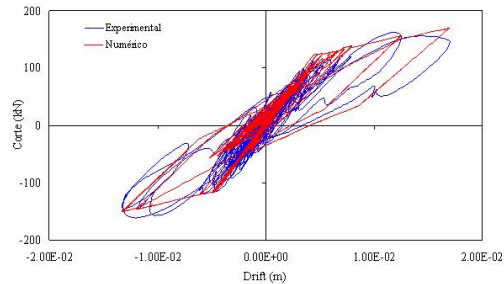


Figura 19: Relação corte *vs* deslocamento considerando não-linearidade em corte e flexão

7 CONCLUSÕES

Da análise dos resultados apresentados anteriormente, para validação do modelo de corte, pode-se concluir que em certos elementos de betão armado, como elementos com rigidez em corte significativa, os modelos não-lineares em flexão, poderão não representar adequadamente o seu comportamento real, particularmente para níveis elevados de solicitação. Os resultados da calibração apresentada anteriormente demonstraram que o modelo que combina a não-linearidade em corte e flexão reproduz melhor os resultados experimentais, quer em termos da curva envolvente de comportamento, quer em termos de comportamento

cíclico e dissipação de energia.

REFERÊNCIAS

- [1] H. Rodrigues, *Desenvolvimento e calibração de modelos numéricos para a análise sísmica de edifícios*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, (2005).
- [2] CEN, *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1-3: Strengthening and repair of buildings*, European prEN 1998-1-3, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, (2003).
- [3] P. Riva and E. Giuriani, *Cyclic behaviour of a full-scale RC structural wall*, Engineering Structures, VOL 25 ELSEVIER, (2003).
- [4] K. Tae-Wan, A.D. Foutch and J.M. LaFave, *A practical model for seismic analysis of reinforced concrete shear wall buildings*, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 9, No. 3, pp.393-417, Imperial College Press, (2005).
- [5] A. Vulcano and V.V. Bertero, *Analytical models for predicting the lateral response of RC shear walls: Evaluation of their reliability*, Report No. UCB/EERC-87/19, EERC, University of California, Berkeley, California, (1987).
- [6] P. Linde, *Numerical modeling and capacity design of earthquake-reinforced concrete walls*, Report No. 200, Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute Technology (ETH), Zurich, Birkhauser, Basel, (1993).
- [7] T. Kabeyasawa, H. Shiohara and S. Otani, *US-Japan cooperative research on R/C full-scale buildings test, Part 5: Discussion on dynamic response system*, M8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 6, San Francisco, California, pp. 627-634, (1984).
- [8] A. Vulcano, V.V. Bertero and V. Colotti, *Analytical modeling of R/C structural walls*, Report No. UCB/EERC-88/17, EERC, University of California, Berkeley, California, U.S., (1988).
- [9] K. Orakcal, J.P. Conte, J.W. Wallace, *Nonlinear modeling of RC Structural walls*, M7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Boston, Massachusetts, (2002).
- [10] F.C. Filippou, A. D'Ambrisi, A. Issa, *Nonlinear static and dynamic analysis of reinforced concrete subassemblages*, Report No. UCB/EERC-92/08, University of California, Berkeley, California, U., (1992).
- [11] H. Varum, *Modelo numérico para a análise de pórticos planos de betão armado*, Dissertação de Mestrado, FEUP, (1996).

- [12] CEB 220, *RC frames under earthquake loading - State-of-the-art report*, (1996).
- [13] R.G. Oesterle, A.E. Fiorato, L.S. Johal; J.E. Carpenter, H.G. Russel and W.G. Corley, *Earthquake resistant structural walls - Test of isolated walls*, Report of National Science Foundation, Construction Technology Laboratories, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, (1976).
- [14] R. G.Oesterle, J.D. Aristizabal-Ochoa, A.E. Fiorato, H.G. Russel, W.G. Corley, *Earthquake resistant structural walls - Test of isolated walls - Phase II*, Construction Technology Laboratories/National Science Foundation, Washington D.C., (1979).
- [15] T.Y. Wang, V.V. Bretero, E.P. Popov , *Hysteretic behaviour of reinforced concrete frame walls*, Report No. UCB/EERC-75/23, EERC, University of California, Berkeley, California, (1975).
- [16] J.M. Vallenias, V.V. Bretero, E.P. Popov , *Hysteretic behaviour of reinforced concrete structural walls*, Report No. UCB/EERC-79/20, University of California, Berkeley, California, (1979).
- [17] M.L. Wang, S.P. Shah, *Reinforced concrete hysteresis model based on the damage concept*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics; Vol. 15, (1987).
- [18] H. Varum, *Seismic assessment, strengthening and repair of existing buildings*, PhD Thesis, Dept. Civil Engineering, University of Aveiro, (2003).